

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.021

运河开挖反复爆破振动作用下桥梁桩基结构 损伤演化与安全评价研究*

王劫耘¹, 张楚², 苏文广², 游佳成², 朱忠义², 彭世伟³, 蒋楠³

(1. 平陆运河集团有限公司 广西现代运河实验室, 南宁 530029;

2. 长江武汉航道工程局, 武汉 430014; 3. 江汉大学 精细爆破全国重点实验室, 武汉 430056)

摘要: 平陆运河航道爆破开挖工程中邻近桥梁桩基长期处于反复爆破振动作用环境, 其结构损伤累积效应直接影响桥梁全寿命周期安全性能。阐明反复爆破振动作用下桩基损伤演化机制, 是保障运河航道高效开挖与邻近桥梁安全运营协同发展的关键科学前提, 依托平陆运河陆杨新村大桥桥区航道爆破工程, 结合考虑混凝土结构累积损伤的有限元数值模型, 模拟分析了现场爆破施工对在建桩基的影响, 基于模型可靠性分析在既定爆心距下模拟分析了不同爆破次数下桩基累计损伤变化规律, 建立了基于桩基峰值振速的损伤变量预测模型, 得出了既定爆心距下的桩基安全累计爆破次数。研究结果表明: 桩基最大损伤变量值出现在爆源水平面迎爆侧, 当爆心距小于20 m时, 桩顶区域损伤显著加剧; 桩基在爆心距为20 m时的安全爆破次数为2~3次。

关键词: 爆破振动; 桥梁桩基; 损伤演化机制; 累积损伤; 数值模拟

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)04-0194-11

Study on Damage Evolution and Safety Assessment of Bridge Pile Foundation Structure under Repeated Blasting Vibrations from Canal Excavation

WANG Jie-yun¹, ZHANG Chu², SU Wen-guang², YOU Jia-cheng²,
ZHU Zhong-yi², PENG Shi-wei³, JIANG Nan³

(1. Pinglu Canal Group Guangxi Laboratory of Modern Canal, Nanning 530029, China;

2. Yangtze River Wuhan Waterway Engineering Bureau, Wuhan 430014, China;

3. National Key Laboratory of Fine Blasting, Jianghan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: In the blasting excavation project of the Pinglu Canal channel, the adjacent bridge pile foundation is in a repeated blasting vibration environment for a long time, and its structural damage accumulation effect directly affects the safety performance of the whole life cycle of the bridge. Clarifying the damage evolution mechanism of pile

收稿日期 (Date of reception): 2025-06-24

网络首发日期 (Published online): 2025-07-22

作者简介: 王劫耘 (1966-), 男, 硕士研究生、教授级高级工程师, 主要从事工程项目建设管理工作, (E-mail) plyhkjxxb@163.com.

通信作者: 蒋楠 (1986-), 男, 博士、教授, 主要从事土木工程和爆破工程研究, (E-mail) jiangnan@jhun.edu.cn.

基金项目: 湖北省自然科学基金杰出青年项目 (2024AFA092); 湖北省重点研发计划项目 (2021BAD004); 武汉市重点研发计划项目 (2024050802030155); 国家自然科学基金资助项目 (42102329, 52478525)

About the author: WANG Jie-yun (1966-), male, graduate student, professor-level senior engineer, mainly engaged in project construction management, (E-mail) plyhkjxxb@163.com.

Corresponding author: JIANG Nan (1986-), male, doctor, professor, mainly engaged in civil engineering and blasting engineering research, (E-mail) jiang nan@jhun.edu.cn.

Fund Programs: Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2024AFA092), the Key Research and Development Program of Hubei Province (No. 2021BAD004), Wuhan key R & D project (2024050802030155), as well as by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42102329, and No. 52478525)

foundations under repeated blasting vibration is a key scientific premise for ensuring the coordinated development of efficient canal channel excavation and the safe operation of adjacent bridges. Based on the channel blasting project for the Luyang New Village Bridge in Pinglu Canal, combined with a finite element numerical model that considers the cumulative damage of the concrete structure, the influence of on-site blasting construction on the pile foundation during construction is simulated and analyzed. Based on the reliability analysis of the model, the cumulative damage variation law of pile foundation under different blasting times is simulated and analyzed. The damage variable prediction model based on the peak vibration velocity of pile foundation is established, and the cumulative blasting times of pile foundation safety under the given blasting center distance are obtained. The results show that the maximum damage variable value of the pile foundation appears on the horizontal side of the explosion source. When the explosion center distance is less than 20 m, the damage to the pile top area is significantly aggravated. The safe blasting times for pile foundations are 2 ~ 3 times longer when the blasting center distance is 20 m.

Key words: blasting vibration; bridge pile foundation; damage evolution mechanism; cumulative damage; numerical simulation

平陆运河作为西部陆海新通道的关键工程,其航道爆破开挖具有显著的经济价值与战略意义。邻近桥梁桩基在长期反复爆破振动作用下产生的累积损伤效应,已成为制约工程安全与效率的核心矛盾。传统单次爆破响应理论难以满足工程安全控制需求,因此分析循环爆破下桩基的累积损伤演化机制具有重要意义。

国内外学者在爆破振动对结构物影响方面已开展系列研究^[1-7],主要聚焦于以下四个方向:在爆破振动传播特性研究领域,Dowding 等^[8],首次提出爆破振动波在岩土介质中的衰减规律,建立经典立方根比例定律(Cube Root Scaling Law),为爆破振速预测奠定理论基础。ZHANG 等^[9],采用分布式光纤传感技术,实现了爆破振动波在桩-土体系中的三维传播重构,揭示了界面反射波的叠加放大效应。在混凝土动态损伤模型发展领域,Kachanov 等^[10],提出的连续损伤力学模型为材料损伤量化提供数学框架。针对爆破荷载特性,Mohotti D 等^[11],将应变率效应引入 Johnson-Holmquist 本构模型,使其可描述高应变率下的混凝土破碎行为。刘康琦等^[12],基于 FLAC 二次开发嵌入损伤模型,分析锁固边坡循环爆破累积损伤及稳定性,得出考虑损伤时安全系数随爆破次数递减,锁固段呈渐进破坏,其位置影响稳定性。Lee 等^[13],提出混凝土循环荷载弹塑性损伤模型,采用双损伤变量和多重硬化屈服函数,分离损伤与弹塑性响应,通过刚度退化标量模型实现热力学一致性,并用数值实验验证有效性。现有模型多基于单次冲击实验标定,对循环荷载下刚度退化与残余应力仍缺乏有效表征。桩基累积损伤机理研究领域,Zhang 等^[14],通过离心机试验证实,10 次等效爆破荷载可使桩侧摩阻力下降 23%。Zhou 等^[15],建立桩土界面累积滑移模型,发现第 3 ~ 5 次

爆破循环为接触刚度突降的临界阶段。

依托平陆运河陆杨新村大桥桥区航道爆破工程,结合考虑混凝土结构累积损伤的有限元数值计算方法,基于既定爆心距分析了不同爆破次数下桩基累计损伤变化规律,建立了基于桩基峰值振速的损伤变量预测模型,提出了临近在建桥梁桩基的安全爆破次数,为工程实践提供指导。

1 邻近桥梁桩基运河开挖工程概况

1.1 邻近新建桥梁桩基运河开挖工程概况

陆杨新村大桥桥区航道爆破工程位于广西壮族自治区钦州市,是西部陆海新通道平陆运河第二标段的航道工程之一。桥梁的建造与航道右半幅爆破开挖工程同时进行。已建成的部分为桥梁的桩基、承台、墩柱以及系梁。桥梁双墩柱混凝土等级为 C40,单根墩柱截面尺寸为 20 m²,墩高 19.0 m,桥墩墩顶设柱间系梁,系梁截面尺寸为 7.5 m²,系梁顶面位于桥墩顶面以下 0.5 m 处,墩柱底部与群桩基础相连,群桩基础由与墩柱底部钢混组合连接的承台以及 6 根长 22 m 的桩组成。土层类型沿地表垂直方向可以分为第四系全新统人工堆积层杂填土,主要为碎石及黏性土;第四系全新统河漫滩及一级阶地冲洪积层,主要为粉质粘土,粉细、中粗砂以及卵砾石;下伏基岩,主要为白垩系上统上组上段粉砂质泥岩,根据风化程度划分为全风化、强风化、中风化层,其中风化粉砂质泥岩为本次航道爆破工程的主要目标,各地层分布走向及高程如图 1 所示。

1.2 现场爆破方案与振动监测

1.2.1 现场爆破方案

根据航道爆破开挖施工环境制定了合理安全的爆破开挖方案。如图 2(a)所示,为保护桥墩及邻近高压电塔的安全,按要求距离桥墩 40 m 范围内采用

液压破碎施工,40~80 m 范围内采用台阶爆破开挖施工。如图 2(b)所示台阶爆破高度为 6 m 分三层爆破,炮孔超深 0.6 m,长度 6.6 m,孔间距 3 m,排距 2.5 m,装药长度 3.6 m 堵塞长度 1.2 m,单孔装药量前排 13.5 kg,后排 15 kg。一次爆破炮孔数量

150 个,总装药量 2200 kg,爆破开挖方量 6000~7200 m³。为保障桥梁建造过程中的施工安全减小爆破振动对已建桥梁桩基、承台、墩柱的不利影响,企石枢纽上游临近陆杨新村大桥航道右半幅爆破开挖方案详情如表 1 所示。

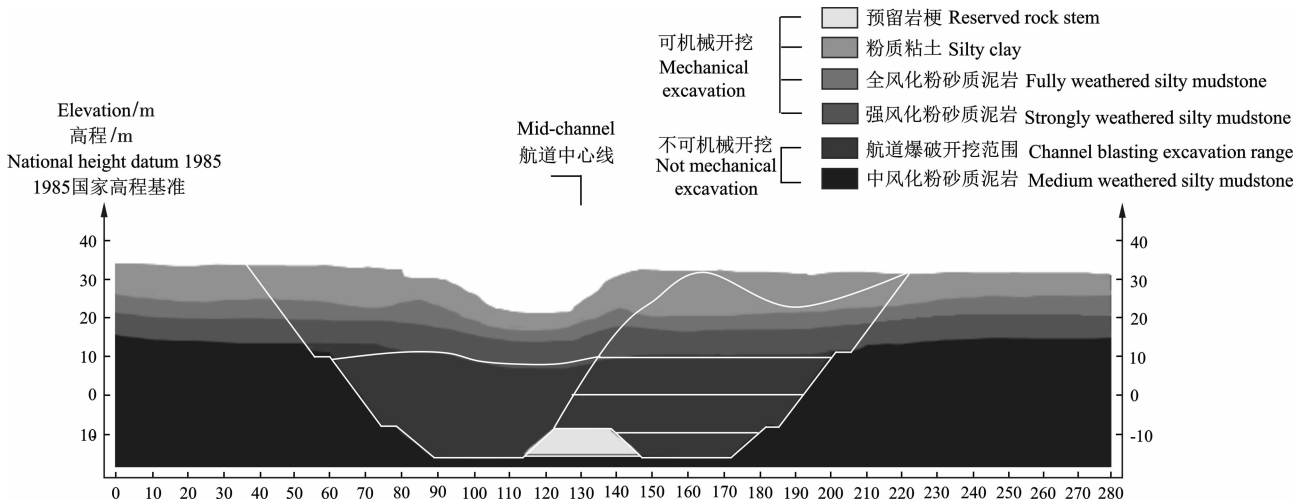


图 1 开挖航道地层分布图

Fig. 1 Stratum distribution map of excavation channel

表 1 爆破开挖方案详情表

Table 1 Detailed blasting excavation scheme

作业层 Operational level	爆破次数 Blasting times	设计标高 Design elevation/m	总爆破面积 Total blasting area/m ²	单次爆破面积 Single blasting area/m ²	单次爆破放量 Single blasting discharge/m ³
第一层 First floor	15	13 - 19	18 184	1200	7200
第二层 Second floor	13	7 - 13	16 386	1150	6800
第三层 Third floor	13	1.4 - 7	15 360	1000	6000

1.2.2 现场爆破监测方案

由于航道右侧还未展开爆破开挖工程,因此为评估航道右侧在建桩基的安全,航道左侧爆破开挖时在航道右侧相邻桩基承台底部布设振速监测点,监测的主要内容为振动速度、振动幅值。如图 3 所示,在距计划爆破开挖区域最近的桩基础 C 承台底部布设 TC-4850 新型爆破振动监测仪,将振动监测传感器用熟石膏粘结在承台上。在安装传感器时,单向振动速度传感器保持铅直;X 方向指向爆源,为水平径向;Y 方向为水平切向;Z 方向铅直。

2 数值计算模型与参数验证分析

2.1 数值计算建模与参数

现场施工条件下的水下爆破环境较为复杂,涉

及到诸多方面,例如地层界面不规则、土质不均匀、周围道路交通的影响等,因此建立数值计算模型时是对施工现场进行合理简化。如图 4 所示,陆杨新村大桥桥区爆破开挖模型主要包括三个部分:主桥桩基、地层以及爆源。其中,桩基包括混凝土和钢筋,桩基及钢筋的尺寸和规格严格参照陆杨新村大桥施工图纸进行建模如图 4(a)、(b)、(c)、(d)所示;地层由上至下为粉质粘土、全、强、中风化粉砂质泥岩。模型整体尺寸 400 m × 250 m × 50 m,桥区爆破开挖模型中除钢筋外的其他实体材料采用六面体单元进行划分,钢筋采用杆单元进行划分。根据研究对象和区域的敏感性和重要性,网格尺寸取 50~400 cm 不等,模型顶部为自由面,而四周及底部采用无反射边界条件以最大程度消除反射波的影响。

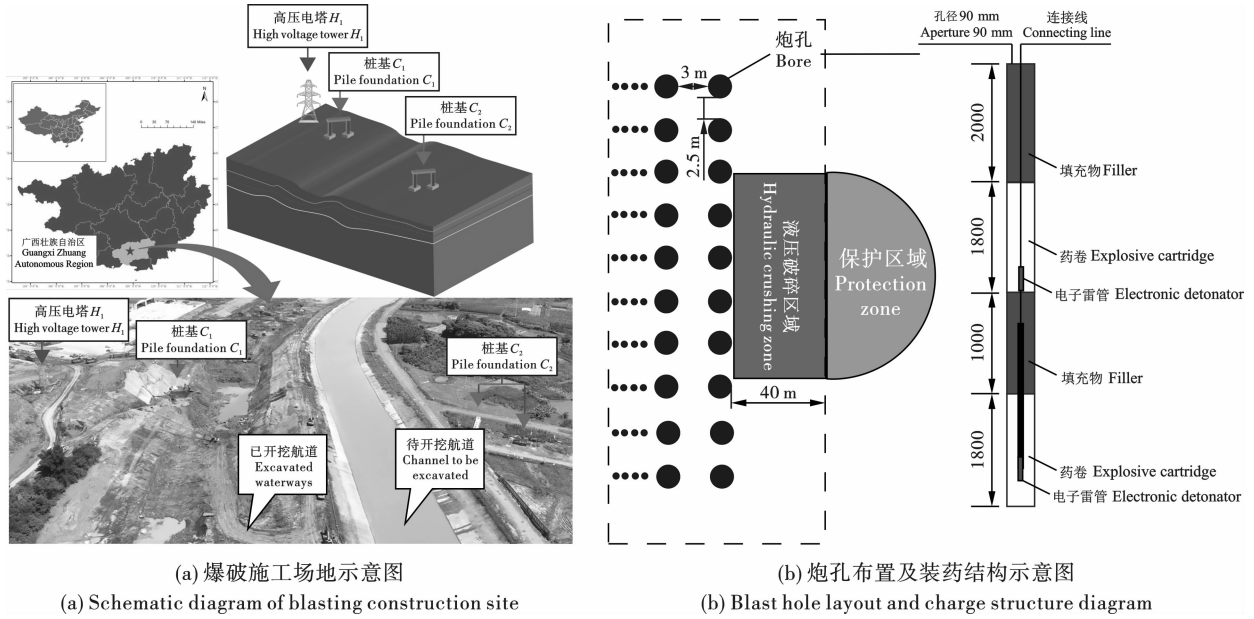


图 2 航道施工示意图

Fig. 2 Schematic diagram of waterway construction

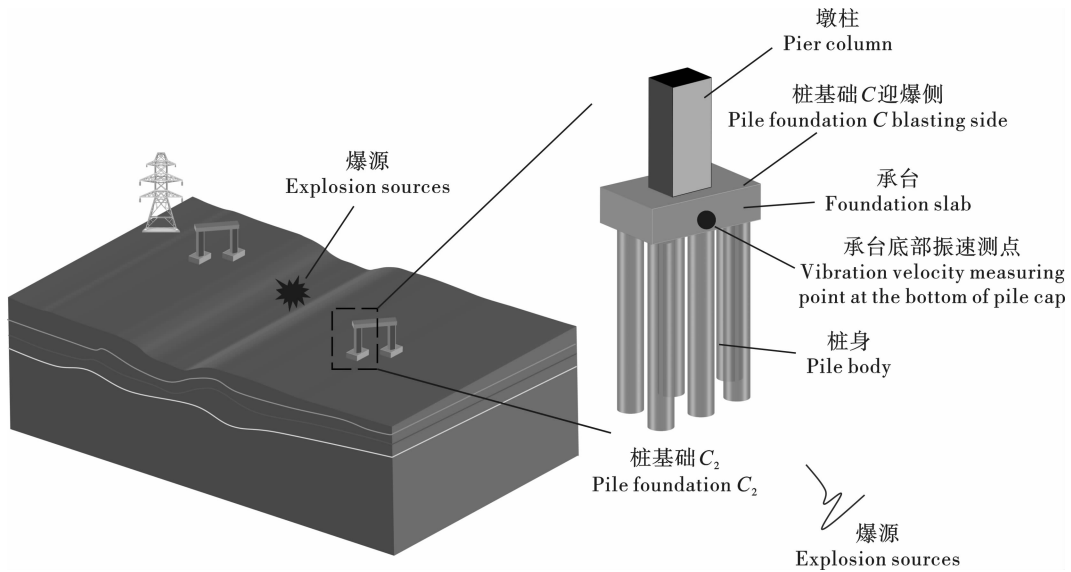


图 3 桩基爆破振动监测布置示意图

Fig. 3 Pile foundation blasting vibration monitoring layout diagram

其中钢筋模型采用 LS-DYNA 材料库中的 MAT_PLASTIC_KINE-MATIC 模型。混凝土模型采用 MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 模型该模型是 LS-DYNA 中用于模拟混凝土、岩石等脆性材料在高应变率、高压和大变形条件下动态响应的本构模型。其损伤模型表达式为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^{fail}} [\varepsilon_p^{fail} = D_1 (P^* + T^*)^{D_2}] \quad (1)$$

其中

$$P^* = P/f'_c \quad (2)$$

$$T^* = T/f'_c \quad (3)$$

$$P = K\mu (\mu = \rho/\rho_0 - 1) \quad (4)$$

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \quad (5)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 为等效塑性应变增量; D_1 、 D_2 为损伤参数; P^* 为无量纲静水压力; T^* 为无量纲偏应力强度。

岩体采用 MAT_MOHR_COULOMB 材料模型模拟。各材料的物理力学参数如表 2 所示。

由于实际炮孔数量众多且相比模型整体而言尺寸极小,对炮孔进行精细化的建模将导致计算难以进行,故采用在爆破开挖弹性边界上施加等效荷载的形式代替实际的爆破荷载。根据凝聚炸药爆轰波的 CJ 理论^[16],耦合装药下炮孔初始平均爆轰压力 P_0 为

$$P_0 = \frac{\rho_0 D^2}{2(\gamma + 1)} \quad (6)$$

式中： ρ_0 为炸药密度； D 为炸药爆轰速度； γ 为炸药等熵指数。

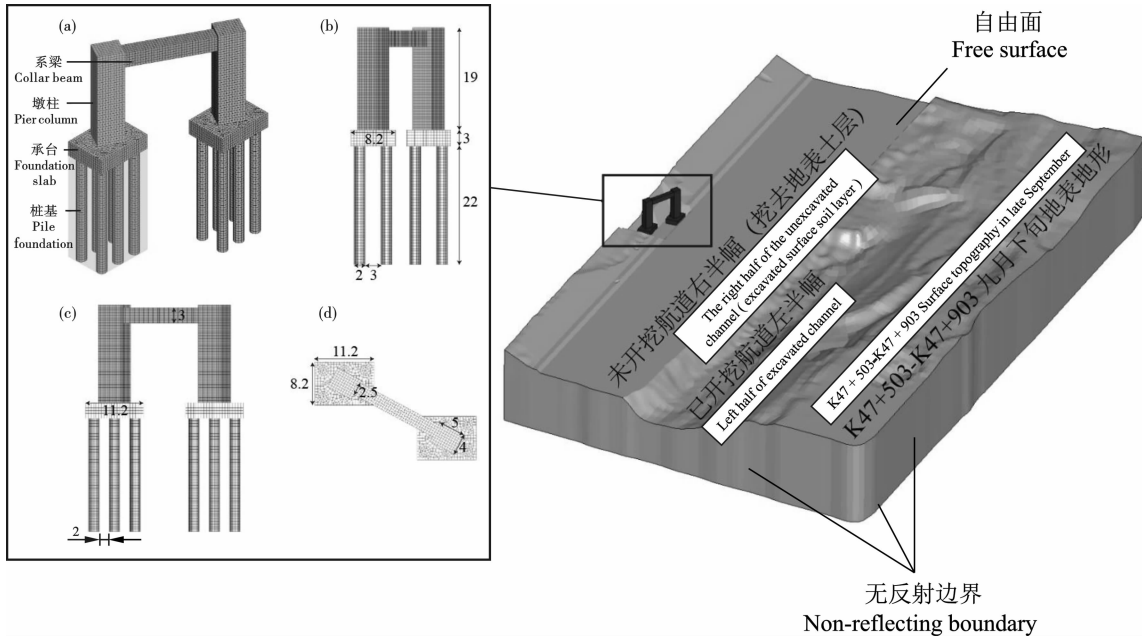


图 4 数值模型(单位:m)
Fig. 4 Numerical model(unit:m)

表 2 各材料物理力学参数表

Table 2 Physical and mechanical parameters of each material

材料 Material	密度 Density/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量 Elastic modulus/GPa	泊松比 Poisson ratio	屈服强度 Yield strength/ MPa	内摩擦角 Angle of internal friction/ $^{\circ}$	粘聚力 Force of cohesion/kPa
混凝土 Concrete	2.4	30	0.2	20	/	/
钢筋 Reinforcement	7.9	210	0.25	235	/	/
中风化粉砂质泥岩 Silty sand qualitative mudstone	2.4	1	0.32	/	26	200

将荷载等效后施加在弹性边界上时,相应的等效荷载峰值大小为

$$P_e = P_0 \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^{2+\frac{\mu}{1-\mu}} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{2-\frac{\mu}{1-\mu}} \quad (7)$$

式中： r_0 为炮孔半径； r_1 为粉碎区半径； r_2 为破碎区半径； μ 为泊松比。取炸药密度 $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ 、爆轰波速 $D = 3200 \text{ m/s}$ 、等熵指数 $\gamma = 3$ ，取粉碎区半径为 3 倍的装药半径，破碎区半径为 10 倍的装药半径，荷载升压时间取 1 ms，作用时间取 8 ms。由式(1)得到炮孔壁上爆炸荷载峰值为 $P_0 = 1280 \text{ MPa}$ ，由式(2)得等效到弹性边界上的爆炸荷载峰值为 13 MPa，等效荷载压力时程曲线如图 5 所示。

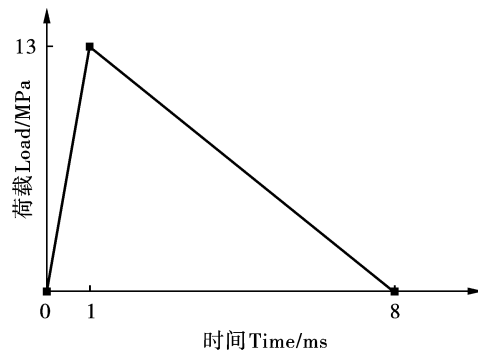


图 5 数值模型
Fig. 5 Numerical model

2.2 计算参数可靠性验证分析

为验证所建立的数值模型的有效性,将数值模

拟计算结果与左岸爆破开挖时桩基础 C 承台底部的振速测点实测数据进行了比较。图 6 所示为现场监测获取的承台质点振动时程曲线和对应地点的数值模拟计算结果对比图。可见,在主振方向 X 方向上,数值模拟所得波形和峰值与实际监测数据吻合度较高;考虑到爆破现场施工细节与数值建模的差异、地形地质的简化建模以及材料力学参数的均一

性假设等等众多影响因素,使得数值模拟得出的测点峰值振速较现场试验更大,可以看到在现场试验条件下,测点峰值振速达 0.68 cm/s,相同测点处的数值模拟结果为 0.80 cm/s,误差在 20% 以内证明模拟结果较为可靠,所建立的数值模型整体上仍较好地反映了爆破开挖振动下桩基的动力响应特征。因此,可采用该模型进行后续进一步的研究分析。

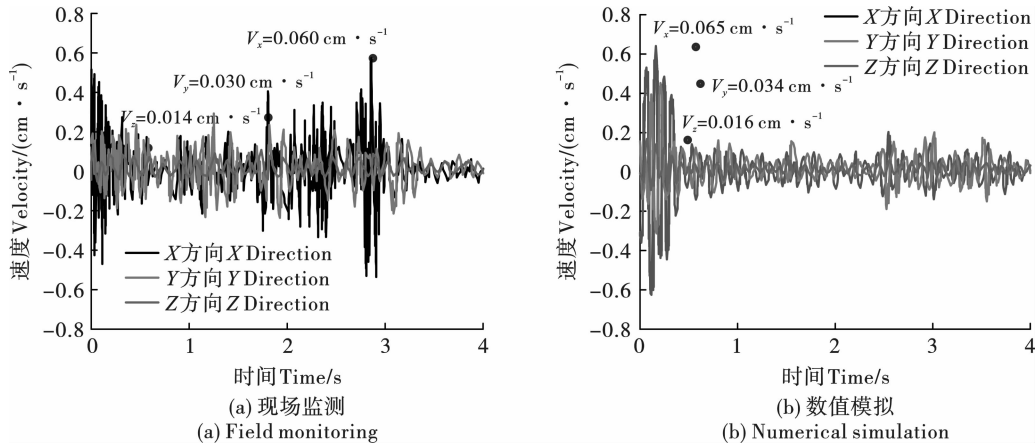


图 6 数值模拟可靠性验证

Fig. 6 Numerical simulation reliability verification

3 反复爆破振动作用下桥梁桩基结构损伤演化规律

3.1 反复爆破结构损伤定义方法及损伤演化数值计算

基于混凝土多相复合材料的本质特征,其内部三相界面普遍存在微裂隙缺陷。在动态爆破荷载作用下,这些固有缺陷的应力集中区域首先会发生局部能量耗散与微损伤演化^[17]。当循环爆破产生的动态拉应力幅值超过材料损伤阈值时,微裂纹将在应力集中区呈放射状萌生扩展,最终形成贯穿性宏观裂缝,致使结构承载性能呈现指数级衰减。爆破损伤研究过程中,常常使用累积损伤变量 D_i 表示损伤程度反映微裂纹扩展与材料性能退化。

$$D_i = 1 - \sqrt{\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_{max}}} \quad (8)$$

式中: ϵ_{cr} 为材料在无损伤状态下能够承受的最大应变阈值; ϵ_{max} 为结构在反复爆破荷载作用下达到的最大应变值; D 为混凝土损伤变量。在现场试验中,为了保证在建桥梁桩基结构的安全稳定,对现场试验爆破工况进行了严格的限制,在距桥梁桩基 40 m 范围内采用液压破碎等机械开挖方式施工因此在该种工况下无法观测到桥梁桩基出现损伤,为分析反复爆破振动作用下桥梁桩基结构损伤演化规律基于 ANSYS/LS-DYNA 累积损伤办法建立了反复爆破振动,桥梁桩基累积损伤有限元数值计算模型。该模型以现场试验为原型,在现场施工基础上调整了爆源与桩基的间距 R ,如图 7 所示。

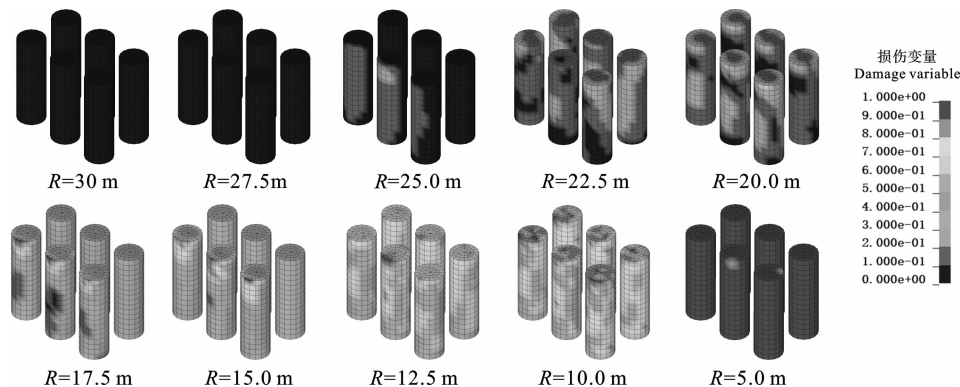


图 7 不同爆心距下桩基损伤分布云图

Fig. 7 Damage distribution cloud diagram of pile foundation under different blast center distance

通过对不同爆心距下桩基的损伤变量变化规律对比确定了桩身产生较大损伤的爆心距为 20 m 并根据该爆心距建立桩基累积损伤数值计算模型,桩身最大损伤变量值随爆心距减小的变化规律如图 8 所示。

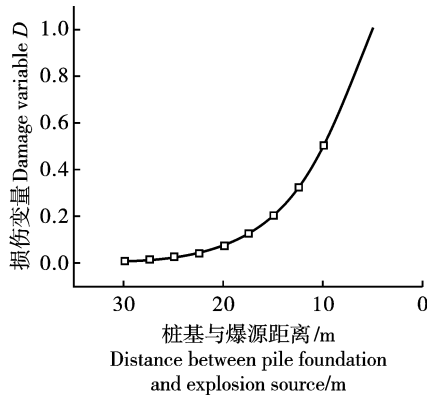


图 8 不同爆心距下桩基最大损伤变量演化规律

Fig. 8 Evolution law of maximum damage variable of pile foundation under different blast center distances

为复现航道分层爆破开挖过程中临近桩基的损伤累积效应,本研究采用 LS-DYNA 的完全重启技术实现迭代模拟:首先进行第一次爆破的完整显式动力学分析,计算结束时将模型状态(包括单元应力、应变、损伤变量、节点位移、速度、加速度等)写入重启文件(d3dump 文件)对于后续的每一次爆破循环,使用前一次计算完成时生成的重启文件作为新计算的初始条件,采用 STRESS-INITIALIZATION 显式地继承前序循环产生的应力场、位移场及损伤变量状态,这确保了前次爆破造成的材料劣化(损伤累积)、残余应力和永久变形等历史效应被准确地传递到当前计算步中,然后重新施加当前次爆

破的等效荷载,计算时间从上次结束的时间点继续累加,完成当前次爆破计算后再次输出包含更新状态的重启动文件用于下一次循环^[18]。三维有限元模型严格遵循施工工序,通过典型显式动力学分析完成首循环计算后,后续 9 个循环均采用重启技术实现连续爆破的递推模拟。每个循环均通过应力初始化模块继承前序爆破产生的力学响应,包括但不限于单元损伤演化、质点速度分布及残余应力状态,从而精确表征多次爆破的叠加效应。

3.2 反复爆破振动作用下桥梁桩基结构动力响应特征

本研究基于 LS-DYNA 构建的临近桩基爆破累积损伤数值模型,系统分析了迎爆侧桩身沿埋深方向的振动响应规律如图 9 所示。监测方案设计为:沿桩身底部至承台底部垂向轴线,以 2.5 m 间距布设混凝土单元振速测点,重点监测首层三次爆破对桩基动力特性的影响。首次爆破荷载作用下,桩身测点的 X、Y、Z 三向振速呈现显著各向异性,其中 X 方向(水平径向)振速为主导分量,其峰值达 4.62 cm/s(桩顶水平面处),Y、Z 方向峰值分别为 1.50 cm/s 与 0.75 cm/s,占比约为 32.5% 与 16.2%。这表明爆破应力波传播受桩-土界面波阻抗差异影响,能量主要沿水平径向释放。此外,振速沿埋深呈指数衰减趋势,至桩底(22 m)时 X 向振速降至 0.52 cm/s,衰减率达 88.7%,印证了土体阻尼对振动能量的耗散作用。经历三次爆破后,桩身各测点 X 向峰值振速均出现 10%~15% 的增幅(如桩顶处从 4.62 cm/s 增至 5.54 cm/s)。值得注意的是,三次爆破的振速空间分布模式高度一致,说明损伤累积未改变振动传递的主控路径,但放大了原有动力响应特征。

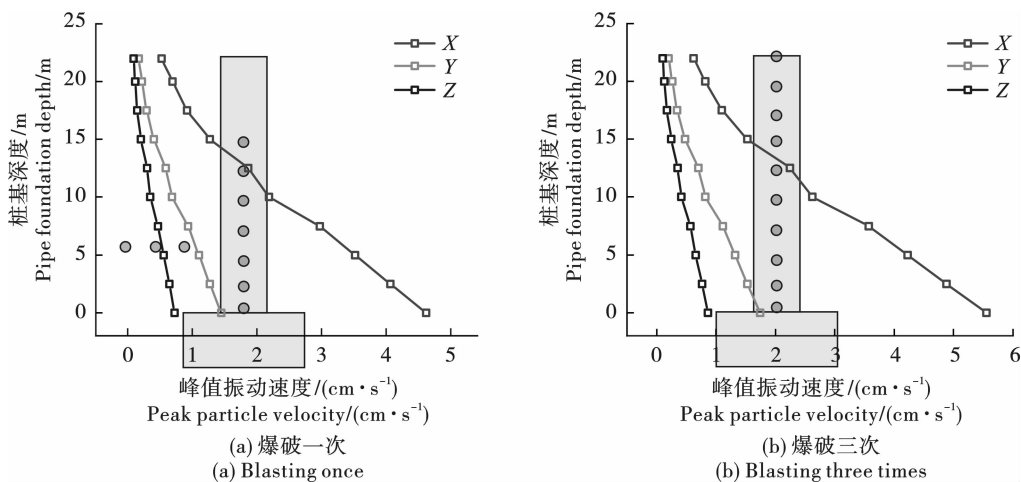


图 9 地表爆破振动下桩身峰值振速分布规律

Fig. 9 Distribution law of peak vibration velocity of pile body under surface blasting vibration

3.3 反复爆破振动作用下桥梁桩基结构损伤分布特征

根据 3.1 节内容可知, 在临近爆破荷载作用下, 在建桩基的损伤情况为, 随着爆源距离的靠近, 以及爆破荷载的增大, 桩基损伤同样会不断增加, 当爆源与在建桩基距离缩小至 15 m 范围内时, 桩基损伤变量 D 会有大幅增加, 属于爆破极度危险距离, 而当爆源距离桩基 30 m 至 15 m 之间时, 桩基损伤变量增幅较缓, 桩基会产生轻微损伤, 当爆源距离桩基 40 m 至 30 m 时, 桩基损伤变量极小可以忽略不计。当爆源距桩基 20 m 时, 由图 10 所示, 桩基损伤变量随着爆破次数的增加而不断增大, 当爆破次数达 6~10 次时, 在桩基顶部与爆源位于同一水平面处的混凝土单元会产生完全损伤, 而在爆破 3~6 次之间, 桩基顶部会产生严重损伤, 在爆破次数 1~3 次之间桩基顶部由微损伤逐渐再增加至轻度损伤。如图 11 所示, 由不同爆破次数后桩基桩身的损伤变量分布云图可知在第一次爆破后桩身顶部会产生较大损伤, 而在埋深 11 m 之下的桩基损伤变量极低, 随

着爆破次数的增加, 桩基垂向混凝土单元损伤变量逐步升高, 当爆破次数达到 10 次时桩身整体均出现不同程度的损伤, 由此可以得出, 在建混凝土桩基在反复爆破荷载作用下的结构损伤变化及分布规律。

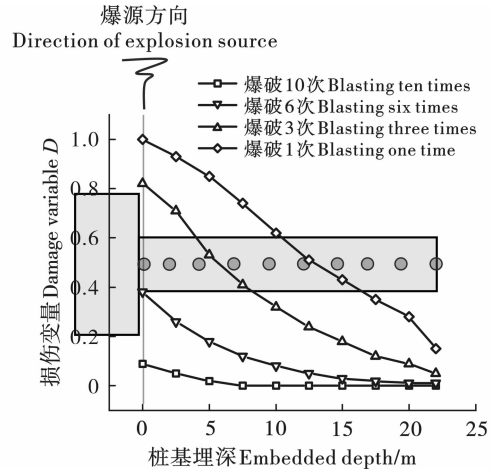


图 10 累计爆破荷载下桩身损伤变量分布演化规律
Fig. 10 Evolution law of pile damage variable distribution under cumulative blasting load

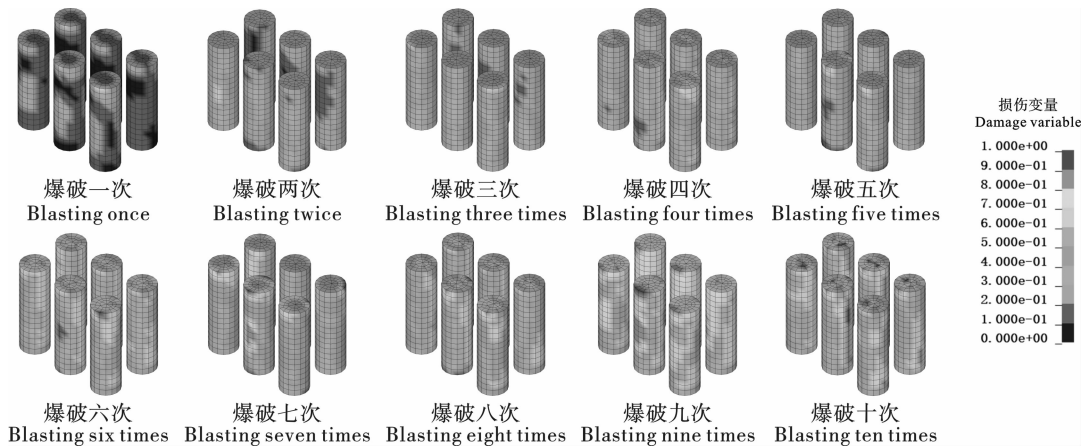


图 11 累计爆破荷载下桩身损伤变量分布演化云图
Fig. 11 Evolution cloud diagram of pile damage variable distribution under cumulative blasting load

4 考虑爆破振动反复作用的桥梁桩基结构安全评价

相关学者建立了弹性模量退化的单自由度模型, 该模型通过将混凝土结构简化为单自由度系统, 结合弹性模量退化表征损伤变量 D , 该模型将混凝土结构简化为单一自由度, 其结构动力学行为仅由单一质量块和等效弹簧-阻尼系统描述。而单自由度系统的固有频率 $\omega(D)$ 由刚度和质量决定, 损伤变量 D 增大会降低系统刚度, 导致固有频率下降

$$\omega(D) = \sqrt{\frac{k(D)}{m}} = \sqrt{\frac{k_0(1-D)}{m}} = \omega_0 \sqrt{1-D} \quad (9)$$

式中: ω_0 为无损状态固有频率; m 为等效质量。由此在共振条件下 $[\Omega = \omega(D)]$ 可以得出材料峰值振动速度与其损伤变量 D 存在以下关系

$$V_{\max} = \frac{F_0}{2m\zeta\omega(D)} = \frac{F_0}{2m\zeta\omega_0 \sqrt{1-D}} \quad (10)$$

即

$$V_{\max} = \frac{A}{\sqrt{1-D}} \quad (11)$$

式中: V_{\max} 为单自由度系统的稳态振动速度幅值; A 为外荷载 F_0 , 等效质量 m 等的综合等效系数。基于原有数值计算模型, 通过调整等效应力即爆破荷载的大小进行数值模拟计算, 得到了桩基在同一爆心距下不同爆破荷载作用下的桩基峰值振速

PPV_c 、临近桩基水平面土体峰值振速 PPV_s 和桩基最大损伤变量 D 。基于以上数值模拟监测数据,分别对桩基峰值振速与临近桩基土体振速、式(11)所

示的桩基峰值振速与桩基损伤变量进行回归分析,得到拟合结果如图 12(a)、(b)所示。

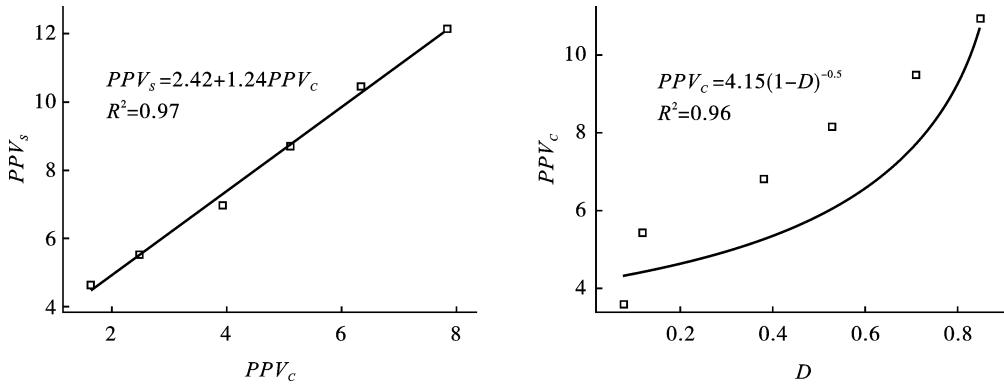


图 12 不同变量间的拟合关系示意图

Fig. 12 The schematic diagram of the fitting relationship between different variables

其线性关系表达式如下

$$PPV_s = 2.42 + 1.24PPV_c \quad (12)$$

$$PPV_c = 4.15(1 - D)^{-0.5} \quad (13)$$

式中: PPV_s 为桩基顶部水平面处周围土体的峰值振速; PPV_c 为桩基混凝土峰值振速; D 为桩基峰值损伤变量。分别对同一爆心距爆破荷载下第一次、第三次、第六次、第十次爆破后桩基的峰值振动速度进行统计分析,拟合得出了不同损伤情况下桩基峰值振速的变化规律拟合关系式,其拟合曲线如图 13 所示。

其线性关系表达式如下

$$PPV_c = 0.9X \quad (14)$$

式中, X 为临近桩基爆破次数。结合式(12~14)可以得到在同一爆破方案下反复爆破荷载对混凝土桩基的累积损伤变量 D 值,及不同桩基累积损伤条件下,地表土体对应的峰值振速。根据爆破安

全规程相关规定,一般民用建筑物的安全允许振速在不同频率振速下为 1.5 至 3.0 cm/s 结合式(12~14)计算统计得到了桩基的地表安全控制振速,及对应的累计安全爆破次数,统计结果见表 3。

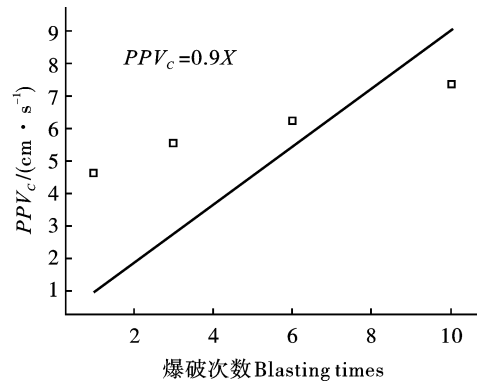


图 13 桩基峰值振速与桩基最大损伤变量拟合关系示意图

Fig. 13 The fitting relationship between PPV_c and blasting times

表 3 爆破安全评价阈值

Table 3 Blasting safety evaluation threshold

频率分布 Frequency distribution	$f \leq 10$ Hz	$10 \text{ Hz} < f \leq 50$ Hz	$f > 50$ Hz
结构安全允许振速 Structural safety allowable vibration velocity	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 2.5	2.5 ~ 3.0
地表安全控制振速 Ground surface safety control vibration velocity	4.28 ~ 4.9	4.9 ~ 5.52	5.52 ~ 6.14
既定爆破工况下的安全累计爆破次数 The safe cumulative blasting times under the given blasting conditions	2	3	3

5 结论

本研究针对平陆运河航道爆破开挖工程中邻近

桥梁桩基在反复爆破振动作用下的损伤累积效应,通过现场监测与数值模拟相结合的方法,系统揭示了桩基损伤的演化机制,并提出了考虑累积损伤的

爆破安全控制标准。

1) 桩基损伤随爆心距减小与爆破次数增加呈非线性累积趋势。当爆心距小于20 m时,桩顶区域损伤显著加剧,尤其在6次爆破后出现损伤拐点,表明损伤累积速率突增。

2) 水平径向(X 方向)振速为主导分量,峰值振速沿桩身埋深呈指数衰减。重复爆破导致桩周土体刚度退化与裂隙扩展,致使后续爆破振速较首次爆破提升10%~15%。

3) 基于损伤变量与峰值振速的非线性关系结合爆破安全规程规定,提出了考虑累积损伤的爆破安全阈值:爆心距20 m内累计爆破次数不宜超过2~3次。

参考文献 (References)

- [1] 黄俊,夏界宁,罗松. 爆破地震作用下的老旧砌体结构动力特性分析[J]. 爆破, 2024, 41(2): 185-193, 202.
- [1] HUANG Jun, XIA Jie-ning, LUO Song. Analysis of dynamic characteristics of old masonry structure under blasting-induced earthquake[J]. *Blasting*, 2024, 41(2): 185-193. (in Chinese)
- [2] 陆瑜,蒙磊,黄婷. 频繁爆破振动作用下砖混结构安全控制标准研究[J]. 爆破, 2023, 40(1): 45-49.
- [2] LU Yu, MENG Lei, HUANG Ting. Study on safety control standard of brick-concrete structure under frequent blasting vibrations[J]. *Blasting*, 2023, 40(1): 45-49. (in Chinese)
- [3] 李新平,王聪,周献忠,等. 动静组合下斜井及相邻洞室围岩损伤分布规律[J]. 武汉理工大学学报, 2025, 47(3): 22-30.
- [3] LI Xin-ping, WANG Cong, ZHOU Xian-zhong, et al. Damage distribution law of surrounding rock of inclined shaft and adjacent caverns under dynamic and static combination[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2025, 47(3): 22-30. (in Chinese)
- [4] 姜聚宇,邢玉娇,王来贵,等. 循环爆破振动作用下含断层边坡稳定性计算方法[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-14. [2025-07-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20250318.1613.003.html>.
- [4] JIANG Ju-yu, XING Yu-jiao, WANG Lai-gui, et al. Calculation of slope stability of fault-containing slopes under the action of cyclic blast vibration[J]. *Coal Science and Technology*: 1-14. [2025-07-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20250318.1613.003.html>. (in Chinese)
- [5] 郑淞宇. 单孔累进爆破引发的围岩累积损伤规律研究[J]. 广东水利水电, 2025(1): 47-51, 62.
- [5] ZHENG Song-wu. Research on the cumulative damage law of surrounding rock caused by single hole progressive blasting[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2025(1): 47-51. (in Chinese)
- [6] 杨德志,赵岩,王海龙. 铁路隧道初期支护混凝土爆破累积损伤特征[J]. 混凝土, 2024(10): 40-45.
- [6] YANG De-zhi, ZHAO Yan, WANG Hai-long. Cumulative damage characteristics of tunnel initial support concrete under blasting load[J]. *Concrete*, 2024(10): 40-45. (in Chinese)
- [7] 王海龙,李帅,赵岩. 累积效应下初支混凝土爆破损伤规律研究[J]. 工程爆破, 2021, 27(4): 29-33, 50.
- [7] WANG Hai-long, LI Shuai, ZHAO Yan. Research on blasting damage law of initial concrete support under cumulative effect[J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(4): 29-33, 50. (in Chinese)
- [8] DOWDING C H. Blast vibration monitoring and control[M]. Prentice Hall, 1985.
- [9] ZHANG Yun-peng, WANG Zong-qin, WU Wen-bing, et al. Three-dimensional wave propagation in a solid pile during torsional low strain integrity test[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2022, 46(12): 2398-2411.
- [10] KACHANOV L M. Rupture time under creep conditions[J]. *International Journal of Fracture*, 1999, 97: 11-18.
- [11] 刘康琦,刘红岩,霍泽楠,等. 循环爆破作用下锁固型岩质边坡的累积损伤效应及稳定性分析[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(4): 153-165.
- [11] LIU Kang-qi, LIU Hong-yan, HUO Ze-nan, et al. Cumulative damage effect and stability analysis of the rock slope with a locked segment under cyclic blasting[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(4): 153-165. (in Chinese)
- [12] MOHOTI D, ALI M, NGO T, et al. Strain rate dependent constitutive model for predicting the material behaviors of polyurea under high strain rate tensile loading[J]. *Materials & Design*, 2014, 53: 830-837.
- [13] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892-900.
- [14] ZHANG Shuai, WEI Ying-qi, CHENG Xiao-hui, et al. Centrifuge modeling of batter pile foundations in laterally spreading soil[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 135: 106166.
- [15] ZHOU Wen-jie, WANG Li-zhong, GUO Zhen, et al. A novel t-z model to predict the pile responses under axial cyclic loadings[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 112: 120-134.
- [16] PAULTRE P. Dynamics of structures[M]. John Wiley & Sons, 2013.

- [17] 王建强,巴智坤,杨秋伟,等. 爆破振动作用下桥梁桩孔稳定性振动台试验研究[J]. 桥梁建设, 2024, 54(3):85-92.
- [17] WANG Jian-qiang, BA Zhi-kun, YANG Qiu-wei, et al. Shaking table test on borehole stability of bridge pile foundation under blasting vibration[J]. Bridge Construction, 2024, 54(3):85-92. (in Chinese)
- [18] 吕国鹏,周传波. 隧道断层带注浆加固围岩体爆破动力损伤特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10):2038-2047.
- [18] LV Guo-peng, ZHOU Chuan-bo. Damage characteristics of grouted tunnel rock mass in fault zones induced by blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10):2038-2047. (in Chinese)

《爆破》杂志征订启事

《爆破》(刊号 ISSN1001-487X, CN42-1164/TJ)创刊于 1984 年(季刊),大 16 开。《爆破》由武汉理工大学主办、中华人民共和国教育部主管,是国内外公开发行的爆破行业权威学术期刊。

办刊宗旨:聚焦爆破领域高新技术前沿动态,构筑交流学术思想、传递科技信息平台,推动中国爆破事业的蓬勃发展

主要栏目:名家论坛、理论与技术探索、矿岩爆破、拆除爆破、特种爆破、爆破器材、安全与管理

读者对象:国内外相关专业科研院所科技工作者、大中专院校师生、企业技术人员及管理人员。本刊还特别注重为青年学者、博士生、硕士生的科研提供服务。

《爆破》论文大多结合我国重大建设工程和爆破界关注的课题,理论研究和工程应用合理搭配。这些内容为各地、各系统爆破工作者提高理论水平,获取新技术构建了学习交流平台,直接服务于生产实践。读者和作者遍布全国各省市,覆盖水利、电力、冶金、煤炭、有色金属、建材、铁路、公路、建筑、地质、石油化工、军工等多个行业,杂志辐射面广、具有较高的学术水平和社会影响力。

《爆破》杂志连续五届进入“中文核心期刊要目总览”,同时还是中国科技论文统计源刊(中国科技核心期刊)、中国科学引文数据库(CSCD)源刊、中国学术期刊<光盘版>源刊、《中国期刊网》源刊、万方数据库源刊、中文科技期刊数据库源刊、《中国核心期刊(遴选)数据库》源刊。在中国知网、“万方数据-数字化期刊群”、维普、超星全文上网。杂志荣获《CJA-CD 规范》执行优秀奖,连续获得五届湖北省优秀期刊奖。

2022 年版中国科技期刊引证报告显示 2021 年《爆破》扩展影响因子 2.246,位居兵器科学与技术第一位。

编辑部现已建成集作者投稿+编辑网络办公+专家评审+主编终审等功能的专业网站。

欢迎投稿、订阅!

杂志可在全国各地邮局订阅,国内邮发代号 38-425,每册定价 RMB ¥20(国内),全年 RMB ¥80(国内)。

也可直接联系编辑部购买,每册定价(含邮费)RMB ¥25(国内),全年(含邮费)RMB ¥100(国内)。

编辑部联系方式和银行账户:

联系方式:

地址:武汉理工大学南湖校区《爆破》杂志编辑部

E-mail:chinablasting@sina.com.cn

电话:(027)87654177

Website:www.chinablasting.com

bopo.cbpt.cnki.net

开户行及账号:

户名:武汉理工大学

开户行:工行洪山支行

账号:3202006709000475962

转账时请备注“爆破杂志订购款”及订阅的年、期、份数。